



تحلیل اکسرژی بستر جاذب در چیلرهای جذب سطحی

هدی طالبیان^۱، مجتبی ماموریان^۲، حمید نیازمند^{۳*}

۱- کارشناس ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

۲- استادیار مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

۳- استاد مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

* مشهد، صندوق پستی ۹۱۷۷۹۴۸۹۴۴، niazmand@um.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: ۲۸ بهمن ۱۳۹۱

پذیرش: ۲۱ تیر ۱۳۹۲

ارائه در سایت: ۳۱ فروردین ۱۳۹۳

کلید واژگان:

چیلر جذب سطحی

تخریب اکسرژی

مدل سازی عددی

ضریب عملکرد

توان تبرید

با توجه به پایین بودن ضریب عملکرد و توان تبرید در چیلرهای جذب سطحی، تعیین محل و میزان بازگشت ناپذیری‌های این سیستم می‌تواند عوامل محدود کننده افزایش پارامترهای عملکردی را شناسایی کند و هم‌راستا با روش‌های حاضر در بهبود عملکرد این سیستم‌ها مؤثر واقع شود. در این مطالعه با استفاده از مدل‌سازی عددی بستر چیلر جذب سطحی و استفاده از توزیع دما که به کمک حل معادلات انرژی در اجزای مختلف آن محاسبه می‌شود، به تعیین مقدار تخریب اکسرژی در فرایندها و اجزای مختلف بستر چیلر جذب سطحی پرداخته شده است. نتایج نشان می‌دهند بیشترین نرخ تخریب اکسرژی مربوط به مراحل جرم ثابت سیکل است؛ هرچند زمان کوتاه این مراحل سبب می‌شود که اکسرژی تخریبی کل مقدار کمی داشته باشد. مقدار کل تخریب اکسرژی در مرحله احیای فشار ثابت، به علت بازگشت ناپذیری بالای فرایند احیا و همچنین زمان زیاد این مرحله، از دیگر مراحل بیشتر است. همچنین بررسی تأثیر ارتفاع و فاصله بین فین‌ها بر میزان تخریب اکسرژی بستر نشان داد که افزایش ارتفاع و افزایش فاصله بین فین‌ها تخریب اکسرژی بستر را افزایش می‌دهد؛ هرچند وابستگی تخریب اکسرژی به تغییر فاصله بین فین‌ها اندک است.

Exergy analysis of the adsorbent bed in adsorption chillers

Hoda Talebian, Mojtaba Mamourian, Hamid Niazmand*

Ferdowsi University, Mashhad, Iran.

*P.O.B. 9177948944 Mashhad, Iran. niazmand@um.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 16 February 2013
Accepted 12 July 2013
Available Online 20 April 2014

Keywords:

Adsorption Chiller
Exergy Destruction
Numerical Modeling
Coefficient of Performance
Cooling Power

ABSTRACT

As the coefficient of performance and the cooling power of adsorption chillers are low, the irreversibility calculation can identify the sources which limit the increase of performance parameters and effectively be used in association with current performance improvement techniques. Adopting the numerical modeling and calculating the temporal distribution of temperature in adsorber elements, this study measures the exergy destruction in different parts and processes of the adsorbent bed. The results show the maximum exergy destruction rate in isosteric phases, yet the total exergy destruction is low due to the short phase times. The highest total exergy loss is observed in isobaric heating phase due to the high irreversibility of desorption process and also long phase duration. Furthermore the effects of fin height and fin spacing on the exergy destruction of adsorbent bed are investigated. The results show that increasing fin height and fin spacing increase the total exergy destruction; however the dependency of fin spacing on exergy destruction is relatively low.

۱- مقدمه

این سیستم از چهار قسمت اصلی تشکیل شده است: بستر جاذب^۱ - که با مواد جاذب^۲ (مانند سیلیکاژل^۳، ژئولیت^۴، کربن اکتیو^۵، و...) پر شده است - کندانسور، اواپراتور و شیر انبساط.

بستر جاذب درون محفظه‌ای تحت خلاء جای دارد. این بستر شامل تعدادی مبدل حرارتی است که در داخل لوله‌های آن سیال حرارتی در جریان است. به منظور تقویت آهنگ انتقال حرارت از سیال حرارتی به بستر جاذب

تبرید جذب سطحی روشی جدید در تولید سرمایش با استفاده از انرژی حرارتی است. قابلیت بکارگیری منابع انرژی با ارزش گرمایی پایین و سازگاری با محیط زیست از جمله مهمترین مزایای این سیستم نسبت به انواع تراکمی و جذب حجمی می‌باشد؛ با این وجود کم بودن ضریب عملکرد، شرایط کارکردی تحت خلاء و حجیم و سنگین بودن از بزرگ‌ترین معایبی است که روند گسترش و فراگیر شدن این فناوری را محدود می‌کند [۱،۲].

۱-۱- معرفی سیستم جذب سطحی

شکل ۱ نمایی از یک چیلر جذب سطحی را نشان می‌دهد.

- 1- Adsorber
- 2- Adsorbent
- 3- Silica-gel
- 4- Zeolite
- 5- Activated carbon

Please cite this article using:

H. Talebian, M. Mamourian, H. Niazmand, Exergy analysis of the adsorbent bed in adsorption chillers, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 2, pp. 70-78, 2014 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

با کاهش دمای بستر، بخار سیال عامل موجود در محفظه در مواد جاذب جذب می‌شود و در نتیجه فشار محفظه از فشار کندانسور تا فشار اواپراتور کاهش می‌یابد.

- مرحله سرمایش فشار ثابت یا جذب سطحی فشار ثابت^۶ پس از رسیدن فشار بستر به فشار اواپراتور، شیر بین بستر و اواپراتور باز شده و سرمایش بستر تداوم می‌یابد. در نتیجه اتصال محفظه جاذب به اواپراتور فشار محفظه ثابت مانده و در اثر کاهش دمای مواد جاذب، فرایند جذب در بستر تسریع می‌شود. خلاء ناشی از مکش سیال عامل توسط مواد جاذب، منجر به تبخیر سیال عامل در اواپراتور شده و تبرید صورت می‌گیرد. لازم به ذکر است در حین جذب سیال عامل در مواد جاذب، مقداری گرما آزاد می‌شود که به آن گرمای جذب^۷ می‌گویند. گرمای جذب میزان انرژی آزاد شده در واحد جرم سیال جذب شده می‌باشد که به کمک سرد کردن بستر، از سیستم خارج می‌شود. پس از جذب درصد معینی از سیال عامل در مواد جاذب، شیر اتصال بین بستر و اواپراتور بسته شده تا با شروع مرحله گرمایش جرم ثابت، سیکل از سر گرفته شود. [۳،۴]

۱-۱-۲- پارامترهای عملکردی سیستم جذب سطحی

با توجه به اصول کارکرد چیلر جذب سطحی، سه پارامتر عملکردی اصلی در حوزه طراحی آن‌ها تعریف می‌شود: ضریب عملکرد^۸ (COP)، توان تبرید مخصوص^۹ (SCP) و توان تبرید کلی^{۱۰} (TCP).

$$COP = \frac{Q_{evap}}{Q_{heating\ cycle}} \quad (1)$$

$$SCP = \frac{Q_{evap}}{m_s \times t_{cycle}} \quad (2)$$

$$TCP = \frac{Q_{evap}}{t_{cycle}} \quad (3)$$

به دلیل پایین بودن این پارامترها، تحقیقات زیادی در راستای بهبود عملکرد این سیستم انجام شده است. از این جمله می‌توان به ایجاد تغییراتی در سیکل اصلی به منظور یکنواخت کردن فرایند سرمایش [۵،۶]، تولید جاذب‌های جدید یا بهبود خواص جفت‌های موجود [۲،۷] و بهبود طراحی بستر جاذب برای افزایش آهنگ انتقال جرم و حرارت اشاره کرد [۳،۸،۹].

۱-۲- اعمال قانون دوم ترمودینامیک در سیستم جذب سطحی

هرچند پارامترهای عملکردی سیستم جذب سطحی به کمک قانون اول ترمودینامیک و حل معادلات انرژی حاکم بر اجزای آن محاسبه می‌شود، اما نتایج حاصل از بررسی قانون اول قادر به مشخص کردن فرایندهای محدود کننده افزایش پارامترهای عملکردی و محاسبه میزان تأثیر آن‌ها نمی‌باشد. از این رو نیاز است تا مقدار و محل بازگشت ناپذیری‌های موجود در سیستم جذب سطحی به کمک بکارگیری قانون دوم ترمودینامیک و تحلیل اتلاف اکسرژی اجزای مختلف آن تعیین شود.

مطالعات اندکی در خصوص بررسی کمی بازگشت ناپذیری‌های مربوط به فرایندهای سیستم جذب سطحی و محاسبه تولید انترپی در قسمت‌های مختلف آن موجود است. مونیر [۱۰] با ارائه مدلی ترمودینامیکی و فرض

معمولاً مجموعه‌ای از فین‌ها به سطح خارجی مبدل‌ها متصل می‌باشند. ذرات جاذب روی سطوح خارجی مبدل‌ها و در میان فین‌ها قرار می‌گیرند. این مواد جاذب متخلخل بوده سطح آزاد زیادی دارند، بنابراین قادرند سیالات خاصی را در این سطوح جذب یا احیا کنند، به گونه‌ای که با عبور یا گرم شدن سیال عامل شروع به احیا^۱ آن کرده و با سرد شدن سیال، آن را جذب^۲ می‌کنند. این فرایند می‌تواند به صورت تکرارپذیر برای مدتی طولانی ادامه یابد؛ به این ترتیب سیال عامل بدون صرف هیچ‌گونه توان مکانیکی در سیکل به گردش در آمده و در واقع بستر جاذب به عنوان کمپرسور حرارتی این سیستم عمل می‌کند.

۱-۱-۱- مراحل سیکل جذب سطحی

- مرحله گرمایش جرم ثابت^۳

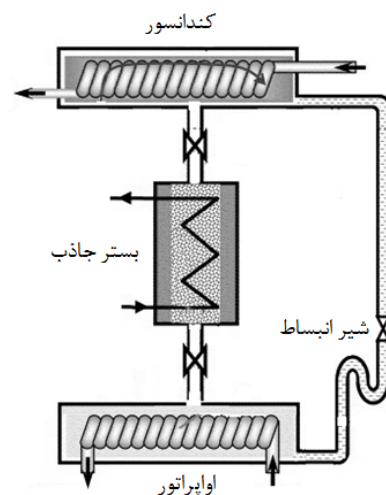
در این مرحله شیرهای اتصال بستر جاذب به کندانسور و اواپراتور بسته‌اند و سیال حرارتی که به وسیله منبع حرارتی گرم می‌شود در لوله‌های بستر در جریان است. با گرم شدن بستر مواد جاذب، دمای آن افزایش یافته و سیال جذب شده در مواد جاذب از فاز جذب شده به فاز بخار تبدیل می‌شود. با احیای سیال عامل و با توجه به بسته بودن شیرها، در مدت زمان اندکی فشار محفظه از فشار اواپراتور تا فشار کندانسور افزایش می‌یابد.

- مرحله گرمایش فشار ثابت یا احیای فشار ثابت^۴

در این مرحله شیر بین بستر و کندانسور باز می‌شود و گرمایش بستر ادامه می‌یابد. با تداوم گرمایش، فرایند احیا به صورت گسترده آغاز می‌شود و به علت اتصال بستر به کندانسور، فشار بخار در محفظه جاذب ثابت مانده و تنها دمای آن افزایش می‌یابد. بخار احیا شده وارد کندانسور می‌شود و پس از تبدیل به فاز مایع، از طریق شیر انبساط وارد اواپراتور می‌شود. در انتهای مرحله گرمایش فشار ثابت، مواد جاذب تا کسر معینی از سیال جذب شونده خالی شده‌اند. لازم به ذکر است که احیا فرایندی گرماگیر است. بنابراین بخشی از حرارت داده شده به بستر صرف تأمین این انرژی خواهد شد.

- مرحله سرمایش جرم ثابت^۵

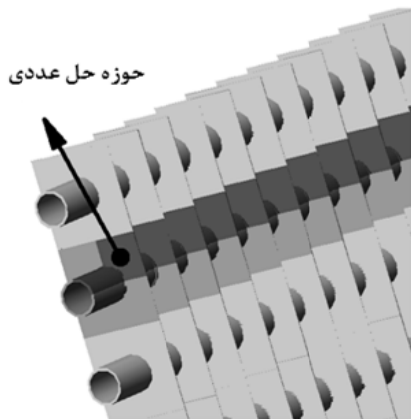
در این مرحله مجدداً شیرهای متصل کننده بستر جاذب به کندانسور و اواپراتور بسته شده و این بار سیال خنک کننده در لوله‌های بستر جاری می‌شود.



شکل ۱ شمایی از چیلر جذب سطحی

- 1- Desorption
- 2- Adsorption
- 3- Isosteric heating
- 4- Isobaric desorption
- 5- Isosteric cooling

- 6- Isoobaric adsorption
- 7- Heat of adsorption
- 8- Coefficient Of Performance
- 9- Specific Cooling Power
- 10- Total Cooling Power



شکل ۲ نمایی از یک مبدل حرارتی و حوزه مربوط به مدل سازی عددی

واسیلیسکو و همکارانش [۱۵] نیز با فرض دما و فشار یکنواخت در بستری بدون فین به تحلیل تخریب اکسرژی در قسمت‌های مختلف سیکل جذب سطحی پرداخته‌اند. هرچند نحوه محاسبه نرخ تخریب اکسرژی ناشی از خروج بخار از بستر و در نظر نگرفتن تخریب اکسرژی در لوله فلزی از دقت محاسبات کاسته است.

با توجه به مطالب اخیر بررسی بازگشت‌ناپذیری‌های موجود در سیکل جذب سطحی و تخریب اکسرژی در مطالعات گذشته همراه با فرضیاتی چون دما و فشار یکنواخت بستر صورت می‌گیرد و در تمامی موارد نیز از بستری بدون فین استفاده شده است. دقت این مطالعات در شرایطی که گرادیان دما در بستر به علت وجود فین افزایش یافته و نیز به علت استفاده از ذرات جاذبی با قطر کوچک، گرادیان فشار قابل ملاحظه باشد، کاهش می‌یابد. در مطالعه حاضر بستر جاذب که مجهز به فین‌های صفحه‌ای است و نیز به علت تأثیر همزمان بازگشت‌ناپذیری‌های مربوط به انتقال حرارت و انتقال جرم بیشترین سهم را در تخریب اکسرژی سیستم دارد، انتخاب شده است و تخریب اکسرژی در آن با در نظر گرفتن گرادیان دما و فشار مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- مدل سازی عددی

۲-۱- حوزه مدل سازی

با توجه به شکل ۲ در این مطالعه از یک مبدل حرارتی با فین‌های صفحه‌ای پیوسته به عنوان بستر مواد جاذب استفاده شده است. ذرات جاذب بستر که سیلیکاژل نوع SWS-1L^۲ با ظرفیت جذب بالا می‌باشد، در قسمت خارجی لوله فلزی و در فضای خالی بین فین‌ها انباشته می‌شود. سیال حرارتی عبوری از لوله فلزی مواد جاذب را بر اساس شرایط سیکل گرم یا سرد می‌کند. از آنجا که مدل‌سازی کل محفظه جاذب به علت حجم بالای محاسبات عملاً امکان‌پذیر نیست، لذا به دلیل تشابه لوله‌ها و تقارن موجود، تنها یک چهارم فضای اطراف یکی از لوله‌ها در مدل‌سازی منظور می‌شود.

۲-۲- معادلات حاکم

۲-۲-۱- قانون اول ترمودینامیک

نظر به اینکه محاسبه تخریب اکسرژی در اجزای بستر جاذب مستلزم تعیین تغییرات دمای این اجزا است، می‌بایست معادلات انتقال حرارت مربوط به حوزه سیال ناقل حرارت، لوله فلزی و فین‌ها به همراه معادلات انتقال حرارت و انتقال جرم مربوط به مواد جاذب و سیال مبرد به صورت هم‌زمان حل

دمای یکنواخت برای تمامی اجزای سیستم جذب سطحی، تولید کل انترویی حرارتی را مجموع سه فرایند اساسی در نظر گرفته است. این فرایندها عبارتند از: انتقال حرارت خارجی، انتقال حرارت داخلی سیستم در مدت زمان بازیافت حرارتی در سیکل‌هایی که حداقل از دو بستر استفاده می‌کنند، مافوق گرم شدن بخار ورودی از اواپراتور به بستر جاذب، کاهش دمای بخار فوق گرم ورودی به کندانسور به همراه اختناق سیال عامل. با صرف نظر کردن از بازگشت‌ناپذیری‌های مربوط به انتقال جرم، نتایج این بررسی نشان می‌دهند که اتصال حرارتی منبع گرمایی با دمای ثابت به بستر جاذبی با دمای متغیر، بخش عمده بازگشت‌ناپذیری‌های مربوط به این سیکل را به خود اختصاص داده است؛ به طوری که در سیکل‌هایی که فاقد بازیابی حرارت هستند، تا ۹۰ درصد تفاوت ضریب عملکرد سیستم از همتای آن در سیکل کارنو^۱ ناشی از این اتصال حرارتی است. چوا و همکارانش [۱۱] تولید انترویی را در قسمت‌های مختلف چیلر جذبی سیلیکاژل-آب که شامل دو بستر و فاقد سیکل بازیابی حرارت است به صورت کمی و در حالت گذرا بررسی کرده‌اند. در این مطالعه بستر جاذب به عنوان یک واحد با دما و فشار یکنواخت فرض شده است و تولید انترویی کل در آن نتیجه انتقال جرم (که تابعی از اختلاف پتانسیل شیمیایی فاز جذب شده و فاز احیا شده می‌باشد)، انتقال حرارت بین بستر و سیال حرارتی و تخلیه سیال خنک‌کننده یا گرم‌کننده به محیط در نظر گرفته می‌شود. البته در مرحله جذب فشار ثابت، تولید انترویی در نتیجه مافوق گرم شدن بخار ورودی از اواپراتور به بستر جاذب نیز به عبارات فوق افزوده می‌شود. نتایج این بررسی نشان می‌دهد که در حالت پایدار سیکی کندانسور کمترین و بستر جاذب بیشترین نرخ تولید انترویی را دارد به طوری که سهم اعظم آن مربوط به فرایند انتقال حرارت و در مراحل جرم ثابت می‌باشد. پنز [۱۲] با معرفی مفهوم دمای متوسط انتروپیک و سیکل‌های کارنو معادل، قانون دوم ترمودینامیک را در سیکل‌های جذب سطحی که از بازیابی حرارت برای بهبود عملکرد استفاده می‌کنند مطالعه کرده است. در این بررسی با فرض فشار ثابت بخار در کل بستر، توزیع دما در بستر به صورت غیر یکنواخت در نظر گرفته شده است. در این شرایط تولید انترویی کل در بستر مجموع تولید انترویی ناشی از انتقال حرارت در سیال حرارتی، لوله فلزی، ذرات جاذب و سیال عامل جذب شده و همچنین انترویی تولید شده در نتیجه فرایند جذب و احیا در نظر گرفته شده است. با فرض ایده‌آل بودن کندانسور و اواپراتور، تولید انترویی در این قسمت‌ها نیز محاسبه شده است و تأثیر پارامترهای عملکردی بر توان تبرید و ضریب عملکرد سیستم به کمک نمودار انترویی-دما بررسی شده است. همچنین پنز در مطالعه مشابه دیگری [۱۳] با فرض هدایت حرارتی یک بعدی در بستر جاذب، به تحلیل بالانس انترویی برای کل سیستم جذب سطحی پرداخته است. این تحلیل با در نظر گرفتن بازگشت‌ناپذیری‌های ناشی از انتقال حرارت میان سیال ناقل حرارت و بستر جاذب، بین سیال عامل و کندانسور و اواپراتور و همچنین بین سیال ناقل حرارت و منابع حرارتی صورت گرفته است. سان و هسو [۱۴] در قسمتی از مدل‌سازی پمپ حرارتی شامل ۴ بستر جاذب به مطالعه تخریب اکسرژی در اجزای مختلف این سیکل پرداخته‌اند. با فرض دما و فشار یکنواخت در بسترها، تخریب اکسرژی در مراحل جذب و احیای جرم ثابت و فشار ثابت به صورت مجزا محاسبه شده است. نتایج مربوط به این مطالعه نشان می‌دهد که بیشترین نرخ تخریب اکسرژی مربوط به بستر جاذب و به ترتیب در مراحل سرمایش و گرمایش جرم ثابت رخ می‌دهد و دلیل اصلی آن وجود اختلاف دمای زیاد در فرایند انتقال حرارت ذکر شده است.

2- CaCl₂ in mesoporous silica gel

1- Carnot cycle

$$\Delta U - T_0 \Delta S = \sum \left(1 - \frac{T_0}{T_i} \right) Q_i + \sum_i m(h - T_0 s) - \sum_f m(h - T_0 s) - T_0 \Delta S_{gen} \quad (11)$$

که در آن:

$$\sum \left(1 - \frac{T_0}{T_i} \right) Q_i = \sum Ex(Q_i) \quad (12)$$

بیان گر انتقال اکسرژی توسط گرما در دمای T_i است و

$$\sum_i m(h - T_0 s) - \sum_f m(h - T_0 s) = \sum \varepsilon_i - \sum \varepsilon_f \quad (13)$$

بیان گر انتقال اکسرژی توسط جریان ورودی و خروجی از سیستم است.

با بازنویسی رابطه (۱۱) بر حسب تولید انترپوی، تخریب اکسرژی قابل محاسبه است:

$$\Pi = \sum Ex(Q_i) + \sum \varepsilon_i - \sum \varepsilon_f - (\Delta U - T_0 \Delta S) \quad (14)$$

معادله اخیر در مراحل مختلف سیکل تبرید جاذب سطحی و برای تمام اجزا و فرایندهای آن قابل اعمال است. لازم به ذکر است که در این بررسی از تخریب اکسرژی مربوط به کندانسور و اواپراتور صرف نظر شده و محاسبات معطوف به بستر جاذب و اجزای آن شده است. همچنین با توجه به اختلاف ناچیز دمای سیال حرارتی بین ورودی و خروجی لوله، این سیال در نقش منبع حرارتی با دمای ثابت در نظر گرفته شده است.

۲-۲-۱- موازنه اکسرژی بستر در مراحل مختلف سیکل تبرید جاذب سطحی

- مرحله گرمایش جرم ثابت (۱-۲)

در این مرحله با توجه به بسته بودن شیرهای ورودی به کندانسور و اواپراتور اکسرژی ورودی و خروجی از بستر صفر است و همچنین به علت تغییرات ناچیز میزان سیال جاذب شده ($w \equiv w_{max}$) از محاسبه گرمای جاذب و انترپوی تولید شده متناظر با آن صرف نظر می شود. بنابراین رابطه (۱۴) به صورت زیر ساده می شود:

$$\Pi_{1-2} = \sum Ex(Q_{1-2}) - (\Delta U_{1-2} - T_0 \Delta S_{1-2}) \quad (15)$$

که در آن:

$$\sum Ex(Q_{1-2}) = \left(1 - \frac{T_0}{T_H} \right) Q_{1-2} = \left(1 - \frac{T_0}{T_H} \right) \times \int_{t_1}^{t_2} \int_{CV} (\rho_s C_s \frac{\partial T_b}{\partial t} + \rho_s C_a w_{max} \frac{\partial T_b}{\partial t} + \rho_f C_f \frac{\partial T_f}{\partial t} + \rho_t C_t \frac{\partial T_t}{\partial t}) dV dt \quad (16)$$

$$\Delta U_{1-2} = \int_{t_1}^{t_2} \int_{CV} (\rho_s (C_s + w_{max} C_a) \frac{\partial T_b}{\partial t} + \rho_f C_f \frac{\partial T_f}{\partial t} + \rho_t C_t \frac{\partial T_t}{\partial t}) dV dt \quad (17)$$

$$\Delta S_{1-2} = \int_{t_1}^{t_2} \int_{CV} (\rho_s C_s \frac{\partial \ln(T_b)}{\partial t} + \rho_s w_{max} C_a \frac{\partial \ln(T_b)}{\partial t} + \rho_f C_f \frac{\partial \ln(T_f)}{\partial t} + \rho_t C_t \frac{\partial \ln(T_t)}{\partial t}) dV dt \quad (18)$$

شایان توجه است که در مرحله گرمایش جرم ثابت و به دنبال آن احیای فشار ثابت بستر با منبع حرارتی دما بالا در تماس است و بنابراین $T_H = T_{in-heating}$ ؛ همچنین دمای محیط برابر با دمای سیال حرارتی خنک کننده در کندانسور است ($T_0 = T_{in-cooling}$) [۲۴].

شوند. این معادلات به شکل گذرا و با فرضیات ساده کننده در دستگاه مختصات مربوط گسسته می شوند. معادلات گسسته شده در برنامه فرترن ایجاد شده با بکارگیری الگوریتم حل ماتریس سه قطری و روش ADI به صورت همزمان حل می شوند. در ادامه به معرفی کلی این معادلات به صورت برداری و در دستگاه مختصات سه بعدی پرداخته می شود. جزئیات مربوط به ساده سازی این معادلات در هر حوزه به همراه فرضیات استفاده شده را می توان در پژوهش های پیشین [۳، ۹، ۱۶] دنبال کرد.

- سیال ناقل حرارت

$$\int_{CV} (\rho C)_{\bar{n}} \frac{\partial T_{\bar{n}}}{\partial t} dV + \int_{CV} \bar{\nabla} \cdot (\rho C \bar{u} T)_{\bar{n}} dV = -Q_{\bar{n}-if} \quad (4)$$

- لوله فلزی

$$\int_{CV} (\rho C)_t \frac{\partial T_t}{\partial t} dV = \int_{CV} \bar{\nabla} \cdot (\lambda \bar{\nabla} T)_t dV \quad (5)$$

- فین ها

$$\int_{CV} (\rho C)_f \frac{\partial T_f}{\partial t} dV = \int_{CV} \bar{\nabla} \cdot (\lambda \bar{\nabla} T)_f dV \quad (6)$$

- مواد جاذب و سیال عامل

$$\int_{CV} (\rho C)_b \frac{\partial T_b}{\partial t} dV + \int_{CV} (\rho_g C_p \bar{u}_g T_b) = \int_{CV} \bar{\nabla} \cdot (\lambda \bar{\nabla} T)_b dV + \int_{CV} \rho_s \Delta H \frac{\partial w}{\partial t} dV \quad (7)$$

در رابطه (۷):

- w مقدار جاذب در هر لحظه می باشد که توسط رابطه نیرو محرکه خطی^۱ [۱۷] به صورت رابطه (۸) محاسبه می شود:

$$\frac{dw}{dt} = \frac{15 D_{so} \exp(-\frac{E_a}{R_u T_b})}{R_p^2} (w^* - w) \quad (8)$$

w^* بیانگر جذب تعادلی در دمای T_b و فشار P است [۱۸].

- سرعت سیال عامل در بستر ماده جاذب توسط قانون دارسی^۲ [۸] به صورت رابطه (۹) محاسبه می شود:

$$\bar{u}_g = -\frac{K_{app}}{\mu} \bar{\nabla} P \quad (9)$$

که در آن K_{app} نفوذپذیری ظاهری بستر است [۱۹-۲۱].

- همچنین برای محاسبه فشار در بستر جاذب از معادله پیوستگی سیال عامل کمک گرفته می شود:

$$\int_{CV} \varepsilon_t \frac{\partial \rho_g}{\partial t} dV + \int_{CV} \bar{\nabla} \cdot (\rho_g \bar{u}_g) dV + \int_{CV} \rho_s \frac{\partial w}{\partial t} dV = 0 \quad (10)$$

۲-۲-۱-۱- شرایط مرزی

شرط مرزی دمایی برای سطوح مشترک بین بستر با لوله فلزی و فین ها و همچنین بین فین ها و لوله فلزی به صورت تعادل حرارتی و بقیه مرزها آدیاباتیک فرض شده اند. همچنین به جز فصل مشترک بستر با محفظه که مقدار فشار برابر با فشار محفظه در نظر گرفته شده است، در سایر مرزها تغییرات فشار در جهت عمود بر صفحه صفر فرض شده است.

۲-۲-۲- قانون دوم ترمودینامیک

معادله عمومی موازنه اکسرژی در حالت گذرا به صورت زیر بیان می شود [۲۲، ۲۳]:

1- Linear driving force (LDF)
2- Darcy law

- مرحله احیای فشار ثابت (۲-۳)

در این مرحله شیر ورودی به کندانسور باز بوده و سیال جاذب شده در سطح ماده جاذب با دریافت حرارت جذب به صورت گسترده احیا شده و این بخار از بستر جاذب به سمت کندانسور خارج می‌شود. اما به علت وجود گرادیان فشار در امتداد بستر نرخ احیای سیال عامل با نرخ خروج بخار از بستر جاذب برابر نیست و این نکته مهم‌ترین وجه تمایز این بررسی با مطالعات پیشین است. رابطه (۱۴) در مرحله احیای فشار ثابت به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\Pi_{2-3} = \sum Ex(Q_{2-3}) - (\Delta U_{2-3} - T_0 \Delta S_{2-3}) - \varepsilon_f \quad (19)$$

که در آن:

$$\sum Ex(Q_{2-3}) = \left(1 - \frac{T_0}{T_H}\right) Q_{2-3} = \left(1 - \frac{T_0}{T_H}\right) \times \int_{t_2}^{t_3} \int_{CV} (\rho_s C_s \frac{\partial T_b}{\partial t} + \rho_s w C_a \frac{\partial T_b}{\partial t} + \varepsilon_i \rho_g C_p \frac{\partial T_b}{\partial t} + \rho_s \Delta H(w) \frac{\partial w}{\partial t} + \rho_f C_f \frac{\partial T_f}{\partial t} + \rho_t C_t \frac{\partial T_t}{\partial t}) dV dt \quad (20)$$

$$\Delta U_{2-3} = \int_{t_2}^{t_3} \int_{CV} (\rho_s C_s \frac{\partial T_b}{\partial t} + \rho_s w C_a \frac{\partial T_b}{\partial t} + \varepsilon_i \rho_g C_v \frac{\partial T_b}{\partial t} + \rho_f C_f \frac{\partial T_f}{\partial t} + \rho_t C_t \frac{\partial T_t}{\partial t}) dV dt \quad (21)$$

$$\Delta S_{2-3} = \int_{t_2}^{t_3} \int_{CV} (\rho_s C_s \frac{\partial \ln(T_b)}{\partial t} + \rho_s C_a w \frac{\partial \ln(T_b)}{\partial t} + \varepsilon_i \rho_g \left(C_p \left(\frac{\partial \ln(T_b)}{\partial t} \right) - R \left(\frac{\partial \ln(P)}{\partial t} \right) \right) + \rho_f C_f \frac{\partial \ln(T_f)}{\partial t} + \rho_t C_t \frac{\partial \ln(T_t)}{\partial t}) dV dt \quad (22)$$

$$\varepsilon_f = \int_{t_2}^{t_3} \int_{CS} u_g \frac{\partial \rho_g}{\partial t} \left((h_g - h_0) + \frac{u_g^2}{2} - T_0 (s_g - s_0) \right) dAdt \quad (23)$$

در رابطه (۲۳) آهنگ جرمی، انتالپی، سرعت و انتروپی خروجی از محفظه جاذب برابر با آهنگ خروجی این پارامترها از سطح مشترک مواد جاذب با محفظه است. همچنین T_0 و P_0 فشار و دمای محیط بوده که در مراحل گرمایش بستر برابر با فشار کندانسور و دمای سیال خنک کننده آن است. h_g و s_g نیز با برازش داده‌های موجود در جداول مربوط به خواص ترمودینامیکی آب در فشار متوسط بستر محاسبه می‌شود.

- مرحله سرمایش جرم ثابت (۳-۴)

همانند مرحله نخست شیرهای ورودی به کندانسور و اواپراتور بسته‌اند و در نتیجه اکسرژی ورودی و خروجی از بستر صفر است. همچنین به علت تغییرات ناچیز میزان سیال جاذب شده ($w \equiv w_{min}$) از محاسبه گرمای جذب و انتروپی تولید شده متناظر با آن صرف نظر می‌شود. شکل ظاهری معادله تخریب اکسرژی در این مرحله همانند مرحله نخست است با این تفاوت که در مرحله سرمایش جرم ثابت و به دنبال آن جذب فشار ثابت، بستر با منبع حرارتی دما پایین در تماس است (آب خنک‌کننده در لوله‌های بستر)؛ بنابراین $T_H = T_{in-cooling}$ ، از طرفی T_0 برابر با دمای اواپراتور در زمان توقف سیستم است ($T_0 = T_{in-cooling}$) [۲۴]؛ در نتیجه می‌توان نوشت:

$$\sum Ex(Q_{3-4}) = \left(1 - \frac{T_0}{T_H}\right) Q_{3-4} = 0 \quad (24)$$

- مرحله جذب فشار ثابت (۴-۱)

در این مرحله شیر ورودی به اواپراتور باز است و بخار وارد شده از اواپراتور با آزاد کردن حرارتی معین (حرارت جذب) در سطح ماده جاذب جذب می‌شود. اما به علت وجود گرادیان فشار در امتداد بستر نرخ جذب سیال عامل با نرخ ورود بخار از اواپراتور برابر نیست. رابطه (۱۴) با توجه به توضیحات مربوط به رابطه (۲۴) در مرحله جذب فشار ثابت به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\Pi_{4-1} = \varepsilon_i - (\Delta U_{4-1} - T_0 \Delta S_{4-1}) \quad (25)$$

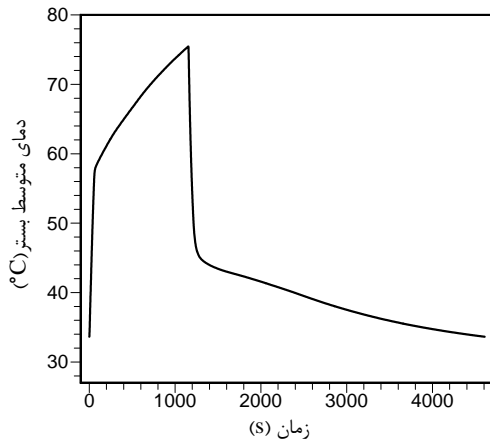
شکل ظاهری روابط مربوط به محاسبه ΔU_{4-1} ، ΔS_{4-1} و ε_i به ترتیب مشابه روابط (۲۱)، (۲۲) و (۲۳) می‌باشد؛ اما باید توجه داشت که در این مرحله دمای سیال عامل ورودی به بستر جاذب ثابت و برابر با دمای اواپراتور است و مقادیر h_g و s_g در این دما و فشار متوسط بستر محاسبه می‌شوند. مقادیر h_0 و s_0 نیز با توجه به شرایط اواپراتور در حالت توقف سیستم بدست می‌آیند.

۲-۳- بررسی استقلال نتایج

در آغاز فرایند محاسبات لازم است نواحی بین فین‌ها، لوله فلزی و سیال ناقل حرارت شبکه‌بندی شوند. شبکه‌بندی بسیار فشرده، زمان محاسبات را طولانی نموده و عکس آن باعث کاهش دقت نتایج می‌شود. بنابراین به تعداد مناسبی از شبکه نیاز است تا علاوه بر ارائه نتایج با دقت مناسب هزینه محاسباتی زیادی نداشته باشد. در این مطالعه تعداد شبکه برای ناحیه بین دو فین بسته به ارتفاع و فاصله بین فین‌ها از $12 \times 12 \times 6$ تا $24 \times 24 \times 12$ تغییر می‌کند که عدد کوچک‌تر مربوط به تعداد شبکه بین دو فین در امتداد محور لوله است. با این انتخاب تنها حدود ۲٪ خطا نسبت به شبکه دو برابر ریزتر وارد محاسبات می‌شود. با انتخاب ۳ شبکه در امتداد شعاعی لوله فلزی، نتایج با خطای کمتر از ۰/۱٪ نسبت به حالتی که شبکه محاسباتی یک و نیم برابر ریزتر شود، بدست می‌آید. تعداد شبکه در امتداد مماسی و محوری لوله فلزی و تعداد شبکه در فین‌ها برابر تعداد شبکه در ناحیه متناظر آن‌ها در حوزه محاسباتی مواد جاذب می‌باشد. از دیگر عوامل مهم استقلال نتایج از گام زمانی است. با توجه به تغییرات شدید دما و فشار در مراحل جرم ثابت می‌بایست گام زمانی مربوط به آن‌ها به اندازه کافی کوچک انتخاب شود. با انتخاب گام زمانی ۰/۰۲ ثانیه برای مراحل جرم ثابت و گام زمانی ۰/۶ ثانیه برای مراحل فشار ثابت نتایجی با حدود ۱/۵٪ خطا نسبت به حالتی که گام زمانی نصف شود بدست می‌آید که برای محاسبات قابل قبول است.

۲-۴- اعتبارسنجی

برای بررسی صحت و دقت مدل‌سازی عددی نیاز است تا نتایج عددی با داده‌های یک نمونه تجربی مقایسه شود. نظر به این که تاکنون بررسی تجربی معتبری در رابطه با بسترهایی با فین‌های صفحه‌ای که فاقد سیکل‌های کمکی بازیابی حرارت و بازیابی جرم باشند صورت نگرفته است؛ لذا اعتبارسنجی این مطالعه با تطبیق شرایط هندسی و عملکردی بستر مدل شده با نمونه آزمایشگاهی رستوکیا و همکارانش [۲۵] انجام شده است. در این مطالعه تجربی از یک چیلر جذب سطحی تک بستره در ابعاد آزمایشگاهی استفاده می‌شود. مبدل حرارتی این سیستم شامل ۸ ردیف لوله بوده که هر ردیف شامل ۵۰ فین حلقوی از جنس فولاد ضدزنگ می‌باشد و فضای بین فین‌ها با ذرات سیلیکازل نوع SWS-1L پر شده‌اند. ارتفاع فین‌ها ۳۴ mm و فاصله بین آن‌ها ۷ mm، دمای آب گرم ورودی به سیستم ۹۵°C و دمای آب خنک کننده ۴۰°C است. در شکل ۳ تغییرات دما و فشار میانگین بستر (مواد جاذب



شکل ۵ تغییرات دمای متوسط بستر جاذب (مواد جاذب و سیال عامل) در طول یک سیکل کاری

جدول ۱ مقادیر پارامترهای عملکردی و هندسی بستر

پارامتر	علامت	مقدار	واحد
قطر داخلی لوله فلزی	D_i	۱۰	mm
قطر خارجی لوله فلزی	D_o	۱۲	mm
ضخامت فین	FT	۰/۲	mm
ارتفاع فین	FH	۳۰	mm
فاصله بین فین‌ها	FS	۹	mm
آهنگ جرم سیال حرارتی	\dot{m}_{fl}	۰/۰۳	kgs ⁻¹
چگالی مواد جاذب	ρ_s	۱۰۸۰	kgm ⁻³
تخلخل کلی	ϵ_t	۰/۷۲	-
گرمای جذب	ΔH	۲۷۶۰	kJ/kg ⁻¹
دمای اواپراتور	T_{evap}	۲۸۳/۱۵	K
دمای گرمایش	$T_{in-heating}$	۳۶۳/۱۵	K
دمای خنک کاری	$T_{in-cooling}$	۳۰۳/۱۵	K

اما در مراحل دوم و چهارم (احیا و جذب فشار ثابت) مقدار جذب در حال تغییر است و مقداری از حرارت مبادله شده صرف تأمین انرژی جذب می شود؛ بنابراین افزایش یا کاهش دما با شیب کمتری نسبت به مراحل جرم ثابت اتفاق می افتد. در مرحله دوم (احیای فشار ثابت) سیال عامل موجود در ذرات جاذب احیا شده و وارد کندانسور می شود و مقدار جذب کاهش می یابد و در مرحله چهارم (جذب فشار ثابت)، با سرد شدن ذرات جاذب، سیال عامل از اواپراتور در ذرات جاذب جذب شده و مقدار جذب افزایش می یابد. محفظه جاذب در مرحله دوم به کندانسور و در مرحله چهارم به اواپراتور متصل است و به دلیل پایین تر بودن فشار در اواپراتور، فرایند جذب در مرحله چهارم با سرعت کمتری نسبت به فرایند احیا در مرحله دوم اتفاق می افتد؛ در نتیجه مدت زمان مرحله چهارم نسبت به مدت زمان مرحله دوم بیشتر است. جزئیات بیشتر مربوط به تغییرات این پارامترها به همراه نحوه تغییرات فشار در بستر جاذب را می توان در بررسی های پیشین [۹،۱۶] دنبال کرد.

۳-۲- اعمال موازنه اکسرژی در بستر جاذب

در این قسمت مطالعه، تخریب اکسرژی در مراحل چهارگانه سیکل جذب سطحی برای بستر به طول ۵۰cm و با مشخصات هندسی و عملکردی ارائه شده در جدول ۱ محاسبه شده است.

نتایج مربوط به نرخ متوسط و مقدار کل اتلاف اکسرژی در هر مرحله از سیکل و به تفکیک فرایندهای آن در جدول ۲ مشاهده می شود. با توجه به

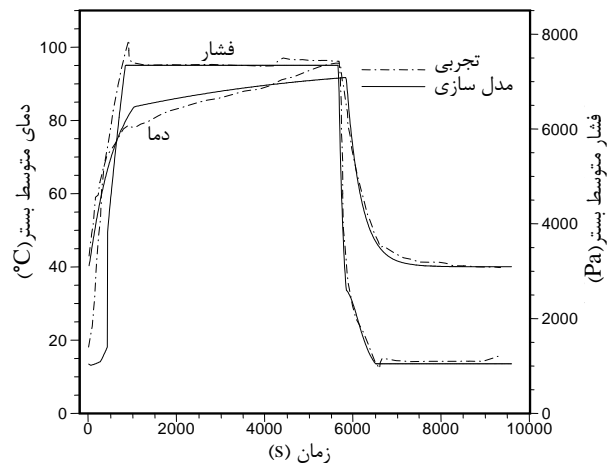
و سیال عامل) در مدت زمان یک سیکل کاری در نمونه آزمایشگاهی به همراه نتایج مدل سازی حاضر نشان داده شده است. با توجه به فرضیات و ساده سازی های اعمال شده در مدل سازی عددی و همچنین تعداد زیاد پارامترهای دخیل، مشاهده می شود نتایج حل عددی دقت قابل قبولی دارد به طوری که حداکثر خطا در پیش بینی دما حدود ۶٪ می باشد.

۳- نتایج

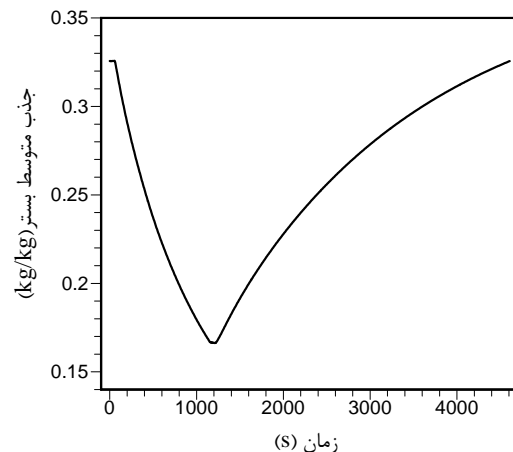
۳-۱- اعمال قانون اول ترمودینامیک

به کمک حل هم زمان معادلات انتقال حرارت و انتقال جرم، توزیع دمای سیال حرارتی، لوله فلزی و فین ها به همراه توزیع دما، فشار و میزان جذب سیال عامل در مواد جاذب در مراحل مختلف سیکل مشخص می شود. شکل های ۴ و ۵ به ترتیب تغییرات مقدار جذب و دمای متوسط را در بستر جاذب (مواد جاذب و سیال عامل) در مدت زمان یک سیکل کاری نشان می دهند. شایان ذکر است این نتایج برای بستری با مشخصات جدول ۱ بدست آمده اند.

با توجه به شکل های ۴ و ۵ در مراحل اول و سوم (مراحل جرم ثابت) مقدار سیال عامل جذب شده تقریباً ثابت می ماند و تمامی حرارت داده شده یا دفع شده از بستر صرف افزایش یا کاهش دمای بستر می شود؛ بنابراین شیب دما در مراحل جرم ثابت بسیار بیشتر از مراحل فشار ثابت است.



شکل ۳ تغییرات دمای متوسط بستر در طول یک سیکل کاری در مدل عددی و مقایسه با نتایج تجربی



شکل ۴ تغییرات مقدار جذب متوسط سیال عامل در بستر در طول یک سیکل کاری

فشار ثابت به عنوان تخمین مناسبی از بازگشت‌ناپذیری کل سیکل در نظر گرفته شده و نرخ این تخریب به موازات توان تبرید کلی سیستم و مقدار کل این تخریب به همراه ضریب عملکرد سیستم بررسی می‌شود.

شکل ۶ تأثیر ارتفاع فین‌ها بر نرخ متوسط تخریب اکسرژی در فرایند احیای فشار ثابت و مقایسه آن با توان تبرید کلی سیستم (رابطه (۳)) را نشان می‌دهد. در شکل ۷ نیز تأثیر ارتفاع فین‌ها بر کل تخریب اکسرژی فرایند احیای فشار ثابت و مقایسه آن با ضریب عملکرد سیستم نشان داده شده است. همان‌گونه که در مراجع [۹،۱۶،۲۶] به تفصیل بررسی شده است، افزایش ارتفاع فین‌ها و افزایش جرم مواد جاذب موجود در بستر از یک سو آهنگ انتقال حرارت و انتقال جرم را در بستر کاهش می‌دهد و از سوی دیگر با افزایش سیال عامل در جریان، ظرفیت تبرید سیستم افزایش می‌یابد. افزایش توان تبرید کلی سیستم در اثر تقابل این دو عامل در شکل ۶ مشهود است. همچنین مشاهده می‌شود با افزایش ارتفاع فین‌ها نرخ تخریب اکسرژی نیز به علت کاهش تغییرات نرخ احیا افزایش یافته است. لازم به توضیح است که کمتر بودن نرخ انتقال حرارت در بسترهایی با فین‌های بلند هرچند باعث کاهش نرخ احیا می‌شود، سرعت کاهش نرخ احیا را نیز کم می‌کند (معادله (۸))؛ در اثر تقابل این دو عامل در نهایت نرخ متوسط تخریب اکسرژی در فرایند احیا با افزایش ارتفاع فین‌ها بیشتر می‌شود. هرچند در این بررسی مشاهده شده است که با افزایش ارتفاع فین‌ها از ۵۰ mm، عامل افزایش یافته و کاهش بازگشت‌ناپذیری بر یکدیگر غلبه کرده و نرخ تخریب اکسرژی تقریباً بدون تغییر باقی مانده است.

با افزایش ارتفاع فین‌ها، جرم مواد جاذب موجود در بستر افزایش می‌یابد و این جرم مستقیماً بر انرژی سرمایشی تولید شده اثر می‌گذارد، از طرفی مقدار حرارت مورد نیاز برای گرمایش بستر نیز افزایش می‌یابد؛ با این حال افزایش انرژی سرمایشی تولید شده بر افزایش انرژی کل مصرف شده غلبه کرده و در نهایت ضریب عملکرد افزایش می‌یابد. با توجه به شکل ۷، هم‌زمان با افزایش ضریب عملکرد سیستم در اثر افزایش ارتفاع فین‌های بستر، کل تخریب اکسرژی فرایند احیا نیز در اثر نرخ بالای تخریب مربوط به آن و همچنین افزایش زمان مرحله گرمایش فشار ثابت، افزایش می‌یابد. شایان ذکر است که با افزایش ارتفاع فین‌ها از ۲۰ mm به ۷۰ mm سهم تخریب اکسرژی مرحله گرمایش فشار ثابت از کل تخریب اکسرژی سیکل، از ۸۰٪ به ۸۴٪ افزایش یافته است.

این نتایج، نرخ متوسط تخریب اکسرژی در مرحله گرمایش جرم ثابت نسبت به سایر مراحل بیشتر است. وجود گرادیان دمای بالا بین منبع حرارتی (سیال ناقل حرارت) و اجزای بستر، نرخ بازگشت‌ناپذیری و به بیان دیگر نرخ اتلاف اکسرژی حرارتی را در مراحل گرمایش و سرمایش جرم ثابت افزایش می‌دهد؛ هرچند در مرحله سرمایش جرم ثابت نرخ اتلاف اکسرژی به علت جرم اندک سیال جاذب شده پایین‌تر است. با وجود نرخ بالای اتلاف اکسرژی در مراحل جرم ثابت، مدت زمان پایین این مراحل سبب می‌شود میزان اکسرژی اتلافی در مجموع این دو مرحله تنها ۱۴ درصد از کل بازگشت‌ناپذیری بستر را شامل شود.

در مرحله گرمایش فشار ثابت نرخ بازگشت‌ناپذیری در نتیجه بازگشت‌ناپذیری بالای فرایند احیا افزایش می‌یابد و زمان زیاد این مرحله سبب می‌شود تا تخریب اکسرژی این فرایند در مجموع ۸۳ درصد کل تخریب اکسرژی سیکل را شامل شود. در مرحله جذب فشار ثابت دمای منبع حرارتی و محیط یکسان است لذا تخریب اکسرژی ناشی از فرایند جذب صفر می‌باشد. بنابراین نرخ بازگشت‌ناپذیری در این مرحله بسیار پایین است به طوری که با وجود مدت زمان زیاد این مرحله، تخریب اکسرژی آن در مجموع ۳ درصد از کل بازگشت‌ناپذیری سیکل را شامل می‌شود.

همان‌گونه که عنوان شد، فرایند احیا با توجه به نرخ بالا و همچنین زمان زیاد مرحله گرمایش فشار ثابت، سهم عمده‌ای در تولید و کنترل بازگشت‌ناپذیری کل سیکل دارد. بنابراین محاسبه تخریب اکسرژی در این فرایند تخمین مناسبی از بازگشت‌ناپذیری کل ارائه داده است و استفاده از آن موجب ساده‌تر شدن تحلیل سیستم می‌شود. در این راستا، به منظور کاهش بازگشت‌ناپذیری کل می‌توان تحلیل تخریب اکسرژی را در جهت کاهش حرارت مورد نیاز فرایند احیا هدایت نمود. البته واضح است که کاهش حرارت احیا هم‌زمان منجر به کاهش توان تبرید سیستم نیز می‌شود. بنابراین بررسی تخریب اکسرژی می‌بایست به موازات بررسی توان تبرید و ضریب عملکرد سیستم صورت گیرد.

۳-۳- تأثیر چیدمان فین‌ها بر بازگشت‌ناپذیری بستر جاذب

بررسی قانون دوم در بستر جاذب می‌تواند پارامترهای هندسی و عملکردی را از نظر میزان تأثیر بر بازگشت‌ناپذیری سیستم بسنجد. در این قسمت به عنوان نمونه به بررسی تأثیر ارتفاع و فاصله بین فین‌ها بر تخریب اکسرژی بستر جاذب پرداخته می‌شود. در این راستا تخریب اکسرژی در مرحله احیای

جدول ۲ تخریب اکسرژی در مراحل مختلف سیکل تبرید جذب سطحی به تفکیک فرایندهای هر مرحله

مرحله سرمایش جرم ثابت (۵۹ s)		مرحله گرمایش جرم ثابت (۵۶ s)	
فرایند	تخریب اکسرژی (W)	فرایند	تخریب اکسرژی (W)
سرمایش مواد جاذب و سیال جذب شده	۲۷/۸	گرمایش مواد جاذب و سیال جذب شده	۴۵/۶
سرمایش لوله فلزی	۴/۵	گرمایش لوله فلزی	۲۵۰
سرمایش فین‌ها	۱/۵	گرمایش فین‌ها	۸۶
مجموع	۳۳/۸	مجموع	۲۸۹۱
مرحله سرمایش فشار ثابت (۳۳۹۶ s)		مرحله گرمایش فشار ثابت (۱۰۹۹ s)	
ورود بخار از اواپراتور به بستر جاذب	۰/۰۱۲	خروج بخار احیا شده از بستر	۵۳۷
جذب	۰	احیا	۲۸۸۲۶
سرمایش مواد جاذب، سیال جذب شده و بخار	۰/۱۴	گرمایش مواد جاذب، سیال جذب شده و بخار	۹۳۸
سرمایش لوله فلزی	۰/۰۰۱	گرمایش لوله فلزی	۸
سرمایش فین‌ها	۰/۰۰۱	گرمایش فین‌ها	۸
مجموع	۰/۱۵	مجموع	۲۹۲۴۰

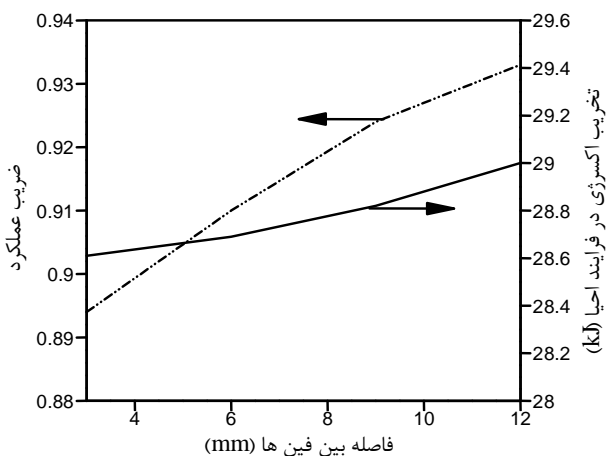
سیستم در نتیجه کاهش ظرفیت تبرید سیستم کاهش یافته است. هم سو با کاهش توان تبرید، نرخ متوسط تخریب اکسرژی مربوط به فرایند احیا نیز در نتیجه کاهش نرخ احیا کاهش می‌یابد.

با افزایش فاصله بین فین‌ها، تعداد فین‌ها کاهش می‌یابد، اما به علت ضخامت ناچیز فین‌ها، جرم مواد جاذب بستر تغییر نمی‌کند؛ در نهایت با کاهش انرژی مورد نیاز برای گرم و سرد کردن فین‌ها، ضریب عملکرد سیستم اندکی افزایش می‌یابد. با توجه به شکل ۹، هم‌زمان با افزایش ضریب عملکرد سیستم در اثر افزایش فاصله بین فین‌های بستر، کل تخریب اکسرژی فرایند احیا نیز در اثر تقابل کاهش نرخ تخریب این فرایند و افزایش زمان مرحله گرمایش فشار ثابت، اندکی افزایش می‌یابد.

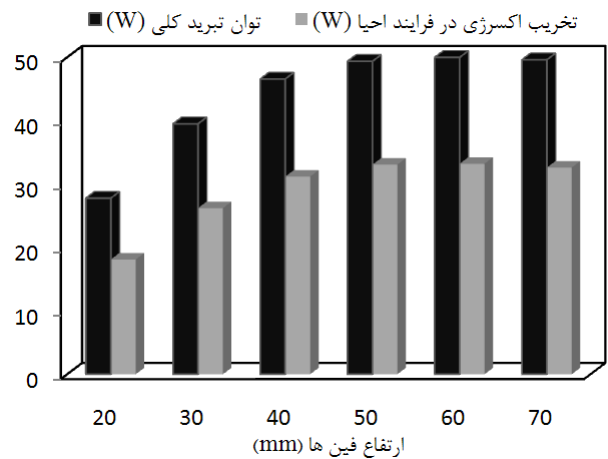
شایان ذکر است که با افزایش فاصله بین فین‌ها از ۳ mm به ۱۲ mm سهم تخریب اکسرژی مرحله گرمایش فشار ثابت از کل تخریب اکسرژی سیکل، تقریباً ثابت و حدود ۸۲٪ باقی می‌ماند.

۴- نتیجه‌گیری

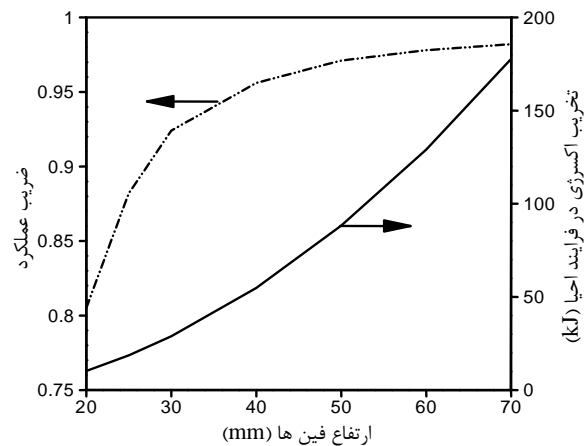
از آن‌جا که تحلیل قانون اول ترمودینامیک فرایندهای محدود کننده افزایش COP و SCP سیستم را معین نمی‌کند، لذا به کمک تحلیل قانون دوم، تخریب اکسرژی مربوط فرایندهای مختلف این سیکل بررسی شده است. بدین منظور ابتدا توزیع دما در بستر جاذب به کمک حل معادلات انرژی تعیین شده و سپس میزان تخریب اکسرژی در اجزای بستر و فرایندهای مربوط به هر مرحله محاسبه شده است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که بیشترین نرخ تخریب اکسرژی مربوط به مراحل اول و سوم سیکل و در اثر گرمایش و سرمایش مواد جامد جاذب و سیال جاذب شده در آن است. هرچند زمان کوتاه این مراحل مانع از افزایش اکسرژی کل تخریبی می‌شود. در سویی دیگر زمان بالای مرحله احیای فشار ثابت و همچنین بازگشت ناپذیری بالای فرایند احیا سبب می‌شود تا مقدار کل تخریب اکسرژی در مرحله احیای فشار ثابت بسیار بیشتر از سایر مراحل باشد. همچنین بررسی تأثیر ارتفاع و فاصله بین فین‌ها بر میزان تخریب اکسرژی بستر نشان داد که با افزایش ارتفاع فین‌ها تخریب اکسرژی بستر افزایش می‌یابد؛ هرچند آهنگ افزایش تخریب اکسرژی با افزایش فاصله بین فین‌ها اندک است.



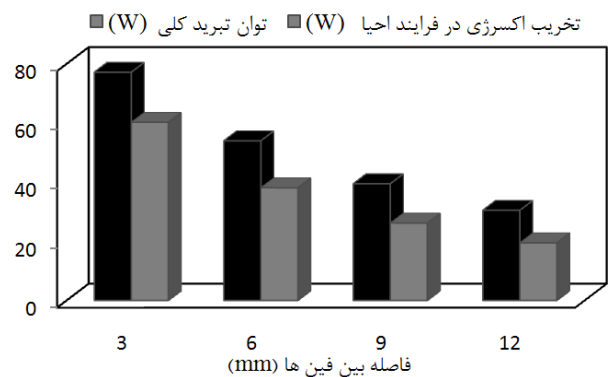
شکل ۹ تغییرات ضریب عملکرد و کل تخریب اکسرژی در فرایند احیای فشار ثابت بر حسب فاصله بین فین‌های بستر



شکل ۶ توان تبرید کلی و نرخ متوسط تخریب اکسرژی در فرایند احیا فشار ثابت بر حسب ارتفاع فین‌های بستر



شکل ۷ تغییرات ضریب عملکرد و کل تخریب اکسرژی در فرایند احیای فشار ثابت بر حسب ارتفاع فین‌های بستر



شکل ۸ تغییرات توان تبرید کلی و نرخ متوسط تخریب اکسرژی در فرایند احیا فشار ثابت بر حسب فاصله بین فین‌های بستر

شکل ۸ تأثیر فاصله بین فین‌ها بر نرخ تخریب اکسرژی در فرایند احیای فشار ثابت و مقایسه آن با توان تبرید کلی سیستم را نشان می‌دهد. در شکل ۹ نیز تأثیر فاصله بین فین‌ها بر کل تخریب اکسرژی فرایند احیای فشار ثابت و مقایسه آن با ضریب عملکرد سیستم نشان داده شده است. افزایش فاصله بین فین‌ها با ثابت باقی ماندن جرم مواد جاذب، نرخ انتقال حرارت را در بستر کاهش داده و در نتیجه سرعت فرایندهای جاذب و احیا در بستر کم می‌شود. در شکل ۸ مشاهده می‌شود که با افزایش فاصله بین فین‌ها، توان تبرید کلی

- [4] H.T. Chua, K.C. Ng, A. Malek, T. Kashiwagi, A. Akisawa, B.B. Saha, Modeling the performance of two-bed, silica gel-water adsorption chillers, *International Journal of Refrigeration*, Vol. 22, pp. 194-204, 1999.
- [5] A. Akahira, K.C.A. Alam, Y. Hamamoto, A. Akisawa, T. Kashiwagi, Mass recovery adsorption refrigeration cycle—improving cooling capacity, *International Journal of Refrigeration*, Vol. 27, pp. 225-234, 2004.
- [6] M.A. Lambert, Design of solar powered adsorption heat pump with ice storage, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 27, pp. 1612-1628, 2007.
- [7] K. Sumathy, K.H. Yeung, L. Yong, Technology development in the solar adsorption refrigeration systems, *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 29, pp. 301-327, 2003.
- [8] K. Leong, Y. Liu, Numerical modeling of combined heat and mass transfer in the adsorbent bed of a zeolite/water cooling system, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 24, pp. 2359-2374, 2004.
- [9] H. Niazmand, H. Talebian, M. Mahdavihah, Bed geometrical specifications effects on the performance of silica/water adsorption chillers, *International Journal of Refrigeration*, Vol. 35, pp. 581-593, 2012.
- [10] F. Meunier, F. Poyelle, M. D. LeVan, Second-law analysis of adsorptive refrigeration cycles: The role of thermal coupling entropy production, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 17, pp. 43-55, 1997.
- [11] H.T. Chua, K.C. Ng, A. Malek, T. Kashiwagi, A. Akisawa, B.B. Saha, Entropy generation analysis of two-bed, silica gel-water, non-regenerative adsorption chillers, *Journal Phys. D: Appl. Phys.*, Vol. 31, pp. 1471-1477, 1998.
- [12] M. Pons, Analysis of the adsorption cycles with thermal regeneration based on the entropic mean temperatures, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 17, pp. 615-627, 1991.
- [13] M. Pons, Second law analysis of adsorption cycles with thermal regeneration, *Journal of Energy Resources Technology*, Vol. 118, pp. 229-236, 1996.
- [14] J. San, H. Hsu, Performance of a multi-bed adsorption heat pump using SWS-1L composite adsorbent and water as the working pair, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 29, pp. 1606-1613, 2009.
- [15] E.E. Vasilescu, R. Boussehain, M.L. Feidt, Exergy analysis of an adsorption refrigeration machine, *International Journal of Exergy*, Vol. 4, pp. 197-215, 2007.
- [16] H. Niazmand, M. Mahdavihah, Effects of plate finned heat exchanger parameters on the adsorption chiller performance, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 50, pp. 939-949, 2013.
- [17] S. Sircar, J.R. Hufton, Why Does the Linear Driving Force Model for Adsorption Kinetics Work?, *Adsorption*, Vol. 6, pp. 137-147, 2000.
- [18] B. Saha, A. Chakraborty, S. Koyama, Y.I. Aristov, A new generation cooling device employing CaCl₂-in-silica gel-water system, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 52, pp. 516-524, 2009.
- [19] R.B. Bird, W.E. Stewart, E.N. Lightfoot, *Transport phenomena*, J. Wiley, 1960.
- [20] H. Lee, G. Thodos, Generalized treatment of self-diffusivity for the gaseous and liquid states of fluids, *Ind. Eng. Chem. Fundam.*, Vol. 22, pp. 17-26, 1983.
- [21] D.M. Ruthven, *Principles of adsorption and adsorption process*, J. Wiley, 1984.
- [22] K. Wark, *Advanced thermodynamics for engineers*, McGraw-Hill, 1995.
- [23] A. Bejan, *Entropy generation through heat and fluid flow*, J. Wiley, 1982.
- [24] R.A. Gaggioli, *The dead state*, ECOS, Italy, 2012.
- [25] G. Restuccia, A. Freni, S. Vasta, Y. Aristov, Selective water sorbent for solid sorption chiller: experimental results and modeling, *International Journal of Refrigeration*, Vol. 27, pp. 284-293, 2004.
- [26] H. Niazmand, I. Dabzadeh, Numerical simulation of heat and mass transfer in adsorbent beds with annular fins, *International Journal of Refrigeration*, Vol. 35, pp. 581-593, 2012.

۵- فهرست علائم

ظرفیت گرمایی ویژه در فشار ثابت ($\text{Jkg}^{-1} \text{K}^{-1}$)	C_p
ظرفیت گرمایی ویژه در حجم ثابت ($\text{Jkg}^{-1} \text{K}^{-1}$)	C_v
ثابت پخشندگی سطحی (m^2s^{-1})	D_{so}
انرژی فعال سازی (Jkg^{-1})	E_a
اکسرژی (J)	Ex
انتالپی (J)	h
نفوذپذیری ظاهری بستر جاذب (m^2)	K_{app}
فشار (Pa)	P
شعاع ذرات جاذب (m)	R_p
ثابت جهانی گازها ($\text{J mol}^{-1} \text{K}^{-1}$)	R_u
انتروپی (JK^{-1})	S
زمان (s)	t
دما (K)	T
بردار سرعت (ms^{-1})، انرژی داخلی (J)	\vec{u}, u
مقدار متوسط سیال عامل جاذب شده	w

علائم یونانی

رسانندگی گرمایی ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$)	λ
ویسکوزیته (Nsm^{-2})	μ
تخریب اکسرژی (J)	Π

زیر نویس ها

بستر ماده جاذب	b
فین، خروجی	f
سیال ناقل حرارت	fl
فاز بخار سیال عامل احیا شده	g
تولید شده	gen
ورودی	i
سطح مشترک	if
ماده جامد جاذب	s
لوله فلزی	t

۶- مراجع

- [1] H. Demir, M. Mobedi, S. Ulku, A review on adsorption heat pumps: Problems and solutions, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 12, pp. 2381-2403, 2008.
- [2] L.W. Wang, R.Z. Wang, R.G. Oliveira, A review on adsorption working pairs for refrigeration, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 13, pp. 518-534, 2009.
- [3] H. Talebian, M. Mahdavihah, H. Niazmand, Numerical Modeling of the Adsorbent Bed to Investigate the Particle Size Effect in Different Conditions, *Journal of Solid and Fluid Mechanics*, Vol. 3, pp. 41-54, 2012. (In Persian)